



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Off nl ungsschrift
⑩ DE 41 42 564 A 1

⑤1 Int. Cl.⁵:
G01 B 11/30

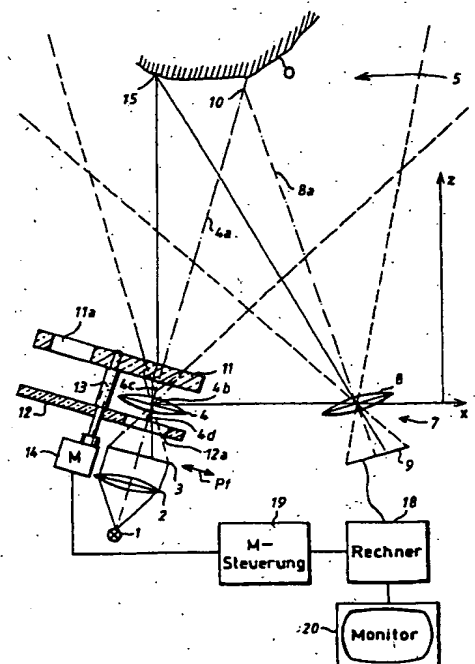
②1 Aktenzeichen: P 41 42 564.2
②2 Anmeldetag: 21. 12. 91
④3 Offenlegungstag: 24. 6. 93

⑦1 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:
Hanßen, Adalbert, 7923 Königsbronn, DE; Hof,
Albrecht, Dr., 7080 Aalen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen mittels projizierter Streifenmuster

⑤7 Gegenstand der vorliegenden Erfindung sind Verfahren und Vorrichtung zur Oberflächenvermessung mittels projizierter Streifenmuster, bei dem ein einziges Gitter (3) durch ein einziges Projektionsobjektiv (4) auf das Meßobjekt (O) projiziert und mit einer einzigen Kamera (8, 9) und mit einer einzigen Kamera (7) aufgezeichnet wird. Um innerhalb eines großen Meßvolumens (5) eindeutige Meßwerte zu erhalten, wird das Gitter (3) mit zwei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben in Zentralprojektion auf das Objekt (O) projiziert, und zur Auswertung die Schwebung zwischen den mit unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben projizierten Mustern herangezogen. In einem ersten Ausführungsbeispiel sind zur Änderung des Abbildungsmaßstabes planparallele Platten (11, 12) vorgesehen, die abwechselnd meßobjektseitig bzw. gitterseitig in den Projektionsstrahlengang einschwenkbar sind. In einem zweiten Ausführungsbeispiel hat das Projektionsobjektiv (34) eine chromatische Vergrößerungsdifferenz. Durch zweifarbige Beleuchtung des Gitters (33) wird dann das Gitter (33) gleichzeitig mit zwei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben auf das Meßobjekt (O) projiziert, und beide Muster gleichzeitig mit einer Farbkamera (37) aufgezeichnet.



DE 41 42 564 A 1

DE 41 42 564 A 1

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen innerhalb eines Meßvolumens mittels auf die Objektoberfläche projizierter Streifenmuster nach den Oberbegriffen der Ansprüche 1 bzw. 6.

Derartige Meßverfahren und zugehörige Meßvorrichtungen sind beispielsweise aus der DE-08 40 07 500 und der EP-OS 03 79 079 bekannt. Die aus der EP 03 79 079 bekannte Meßvorrichtung enthält innerhalb des Streifenprojektors einen Gitterträger, auf dem drei Gitter leicht unterschiedlicher Periode angeordnet sind. Die drei Streifenmuster werden jeweils nacheinander telezentrisch auf das Meßobjekt projiziert und die am Meßobjekt deformierten Streifenmuster werden mit einer Kamera aufgezeichnet. Durch rechnerische Verknüpfung der aus Mustern unterschiedlicher Periode ermittelten Restphasenwerte wird die Schwebung zwischen den projizierten Mustern gebildet. Die Auswertung dieser Schwebung liefert innerhalb des Meßvolumens eindeutige Koordinaten der Objektoberfläche. Durch Verknüpfung dieses relativ groben Koordinatenmeßwertes mit den Restphasenwerten eines einzigen projizierten Musters wird dann ein Koordinatenmeßwert mit höherer Genauigkeit berechnet.

Nachteilig bei dieser bekannten Vorrichtung ist, daß aufgrund der telezentrischen Projektion der Streifenmuster jeweils nur relativ kleine Oberflächenbereiche vermessen werden können. Außerdem benötigt diese Meßvorrichtung mehrere hochgenaue Streifenmuster, deren Perioden jeweils genau bekannt sein müssen.

Aus der DE-OS 40 07 500 ist es darüber hinaus bekannt, Streifenmuster unterschiedlicher Periode in Zentralprojektion in das Meßvolumen zu projizieren. Dadurch können auch größere Oberflächen oder Oberflächenbereiche gleichzeitig vermessen werden. Durch Auswertung der Schwebung beider projizierter Muster unterschiedlicher Periode ist auch hier die Bestimmung der Objektkoordinaten innerhalb eines großen Eindeutigkeitsbereiches möglich. Die in dieser Offenlegungsschrift beschriebenen Auswerteverfahren benötigen zusätzlich noch die Projektion identischer Muster durch einen zweiten Projektor. Daher sind bei dieser Meßvorrichtung mindestens zwei Projektoren mit jeweils zwei Projektionsgittern erforderlich. In der zur korrespondierenden europäischen Patentanmeldung eingereichten deutschen Zusatzanmeldung mit dem Aktenzeichen P 41 29 796 ist es darüber hinaus bekannt, die Schwebungsfrequenzen als Differenz zwischen den gemessenen Streifenphasen und rechnerisch gebildeten Referenzphasen zu berechnen. Dadurch ist es möglich, bei gleichbleibendem Eindeutigkeitsbereich und gleicher Meßauflösung auf ein drittes Projektionssystem zu verzichten. Jedoch müssen auch hier mindestens zwei Gitter vorhanden sein, die in das Meßvolumen projiziert werden.

Aus der EP-PS 02 62 089 ist eine weitere Streifenprojektionsvorrichtung bekannt, die bei vergleichbarem Eindeutigkeitsbereich nur einen einzigen Projektor benötigt. Hier sind innerhalb des Projektors zwei Streifengitter gegeneinander verdrehbar angeordnet, deren Moire-Muster auf das Objekt projiziert wird. Durch Verdrehung der beiden Strichgitter gegeneinander kann die Periode des Moire-Musters variiert, und damit dem jeweilig geforderten Eindeutigkeitsbereich angepaßt werden.

Ein Streifenprojektionssystem, das nur ein einziges Gitter und einen einzigen Projektor enthält, ist beispielsweise aus der US-PS 46 41 972 bekannt. Dort wird jedoch nur ein einziges Muster auf das Objekt projiziert. Dadurch ist die Vermessung unstetiger Objektoberflächen nur innerhalb eines kleinen Eindeutigkeitsbereiches möglich.

Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein möglichst einfaches Streifenprojektionssystem zu schaffen, mit dem auch unstetige Objektoberflächen innerhalb eines großen Meßvolumens eindeutig vermessen werden können, das nur einen einzigen der Kamera zugeordneten Projektor hat, und bei dem innerhalb des Projektors nur ein einziges Streifenmuster erzeugt zu werden braucht. Außerdem sollte auch die Vermessung großer Objektoberflächen möglich sein.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 6 gelöst. Es wird dasselbe Streifenmuster mit vorzugsweise sinusförmiger Helligkeitsverteilung senkrecht zu den Streifen mit mindestens zwei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben in das Meßvolumen projiziert, und die Schwebung zwischen den mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab projizierten Mustern gebildet wird.

Erfindungsgemäß besteht damit jedes Projektions-Detektions-System lediglich aus einem einzigen Streifenprojektor und einer einzigen Kamera. Innerhalb des Streifenprojektors wird lediglich ein einziges Streifenmuster erzeugt. Wird das Streifenmuster durch ein Ronchi-Gitter erzeugt, so ist im Streifenprojektor lediglich ein einziges Ronchi-Gitter angeordnet. Und auch, wenn das Streifenmuster selbst durch ein im Streifenprojektor integriertes Interferometer erzeugt ist, wird lediglich ein einziges Interferometer benötigt.

Vorzugsweise wird das Streifenmuster in Zentralprojektion in das Meßvolumen projiziert. Dadurch ist einerseits die gleichzeitige Vermessung großer Objektoberflächen möglich, und zum anderen lassen sich dann die unterschiedlichen Abbildungsmaßstäbe besonders einfach realisieren. Die Änderung des Abbildungsmaßstabes ist dann bei gleichzeitiger Verwendung eines einzigen Projektionsobjektivs beispielsweise dadurch möglich, daß der Abstand zwischen dem Gitter und dem Projektionsobjektiv variiert wird, beispielsweise indem das Gitter senkrecht zur Gitterebene verschoben wird.

Vorteilhafterweise sind jedoch das Gitter und das Projektionsobjektiv in einem festen Abstand zueinander angeordnet, und es werden lediglich die Lagen der gitterseitigen und/oder der meßvolumenseitigen Hauptpunkte des Projektionsobjektivs definiert variiert. Werden die Lagen beider Hauptpunkte des Projektionsobjektivs variiert, so ist es möglich, die Bildebene des Gitters innerhalb des Meßvolumens in beiden Projektionssituationen konstant zu halten. Die Änderung der Abbildungsmaßstäbe hat dann keinen Einfluß auf den Streifenkontrast am Ort der zu vermessenden Objektoberfläche.

Bei einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel der Erfindung sind innerhalb des Streifenprojektors in den Strahlengang einschwenkbare planparallele Platten oder konzentrische Menisken aus transparentem Material

vorgesehen. Diese planparallelen Platten oder konzentrischen Menisken verlagern den Hauptpunkt des Gesamtsystemes auf derjenigen Seite, auf der die planparallele Platte bzw. der konzentrische Meniskus eingeschwenkt ist. Werden die planparallelen Platten bzw. konzentrischen Menisken jeweils abwechselnd meßobjektseitig und gitterseitig eingeschwenkt, so ist die Lage des scharfen Gitterbildes in beiden Projektionssituationen die gleiche, wenn das Verhältnis ihrer Dicken dem Quadrat des Abbildungsmaßstabes entspricht.

Bei Anordnungen, bei denen die optischen Achsen von Projektor und Kamera parallel zueinander ausgerichtet sind, sollten die Planplatten bzw. Menisken geneigt zur optischen Achse des Projektors in den Strahlengang einschwenkbar sein. Die Einschwenkung verursacht dann sowohl eine Verlagerung der Objektivhauptpunkte in Richtung der optischen Achse als auch senkrecht zur optischen Achse, wodurch der durch das Einschwenken erzielte Effekt verstärkt wird.

Bei einem alternativen Ausführungsbeispiel ist das Projektionsobjektiv ein Varioobjektiv, das in zwei Schaltstellungen mit unterschiedlichen Hauptpunktständen schaltbar ist, z.B. durch Ein- und Ausschwenken von planparallelen Glasplatten oder durch Verschieben von Linsengruppen zwischen zwei Anschlägen.

Bei einem besonders vorteilhaften Ausführungsbeispiel weist das Projektionsobjektiv einen chromatischen Vergrößerungsfehler auf. Es ist dann möglich, das Projektionsgitter gleichzeitig mit Licht zweier verschiedener Farben zu beleuchten, und damit gleichzeitig zwei Muster mit unterschiedlicher Periode in das Meßvolumen zu projizieren. Mit einer Farbkamera können dann beide Muster gleichzeitig getrennt aufgezeichnet werden. Da dann beide Muster gleichzeitig aufgezeichnet werden, ist eine solche Anordnung besonders schnell und insbesondere zur Vermessung bewegter Objekte geeignet.

Im folgenden werden Einzelheiten der Erfindung anhand der in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1a eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung mit in den Projektionsstrahlengang einschwenkbaren planparallelen Platten;

Fig. 1b eine perspektivische Darstellung des aus Objektiv und einschwenkbaren Platten bestehenden Systems beim Ausführungsbeispiel aus Fig. 1a;

Fig. 1c ein Diagramm der Strahlengänge zur Erläuterung der geometrischen Anordnung;

Fig. 2a ein Diagramm der Strahlengänge bei meßobjektseitig eingeschwenkter planparalleler Platte;

Fig. 2b ein Diagramm der Strahlengänge bei gitterseitig eingeschwenkter planparalleler Platte;

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels mit einem Projektionsobjektiv, das mit einem chromatischen Vergrößerungsfehler behaftet ist;

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels mit parallel zueinander ausgerichteten Projektions- und Kameraachsen; und

Fig. 5 ein Diagramm zur Erläuterung des im Auswerterechner ablaufenden Auswerteverfahrens.

Die Meßvorrichtung in Fig. 1a hat eine Lichtquelle (1), die über eine Linse (2) ein Gitter (3) mit abwechselnd transparenten und opaken Bereichen gleichförmig ausleuchtet. Ein Projektionsobjektiv (4) projiziert das Gitter (3) in Zentralprojektion in das Meßvolumen (5) auf ein innerhalb des Meßvolumens angeordnetes Meßobjekt (0). Das auf das Meßobjekt (0) projizierte Streifenmuster wird von einer Kamera (7), die ein Kameraobjektiv (8) und einen CCD-Sensor (9) enthält, aufgezeichnet. Das Projektionsobjektiv (4) und das Kameraobjektiv (8) sind im Abstand zueinander so angeordnet, daß sich die optische Achse (4a) des Projektionsobjektivs (4) und die optische Achse (8a) des Kameraobjektivs (8) in einem Punkt (10) innerhalb des Meßvolumens (5) schneiden. Im Projektor (P) sind zwei planparallele Glasplatten (11, 12) an einer zur optischen Achse (4a) des Projektionsobjektivs parallelen Antriebswelle (13) angeordnet. Die planparallelen Platten weisen jeweils an bezüglich der Welle (13) gegenüberliegenden Seiten Durchbrüche (11a, 12a) auf. Bei einer Drehung der Welle (13) durch den Motor (14) wird abwechselnd die planparallele Platte (11) zwischen dem Projektionsobjektiv (4) und dem Meßvolumen (5) bzw. die planparallele Platte (12) zwischen dem Projektionsobjektiv (4) und dem Gitter (3) eingeschwenkt, d. h. es befindet sich zu jedem Zeitpunkt, zu dem gemessen wird, jeweils nur eine planparallele Glasplatte im Strahlengang. Die jeweils andere planparallele Platte ist dann jeweils so orientiert, daß der Projektionslichtkegel gerade den Durchbruch (11a, 12a) dieser planparallelen Platte durchsetzt. Der durch die planparallelen Platten (11, 12) verursachte parallele Strahlenversatz bewirkt bei der Zentralprojektion eine Verlagerung des Projektionszentrums in diejenige Richtung, auf der die planparallele Platte gerade eingeschwenkt ist. Dies wird weiter unten noch anhand der Fig. 2a und 2b näher erläutert.

Das jeweils von der Kamera (7) aufgenommene Bild des Meßvolumens wird von einem Rechner (18) ausgelesen. Anschließend steuert der Rechner (18) über eine Motorsteuerung (19) den Antriebsmotor (14) an, der die Welle (13) um 180° dreht. Dann ist die Planplatte (11) aus dem Projektionsstrahlengang ausgeschwenkt, und die Planplatte (12) zwischen dem Projektionsobjektiv (4) und dem Gitter (3) eingeschwenkt. Im Anschluß daran wird von der Kamera (7) ein zweites Bild des Meßvolumens aufgenommen. Der Rechner (18) wertet dann die beiden aufgenommenen Bilder entsprechend des weiter unten noch näher beschriebenen Auswerteverfahrens aus. Die zu dem Meßobjekt (0) gehörigen Oberflächenkoordinaten werden dann auf einem Monitor (19) graphisch dargestellt.

Der nähere Aufbau der planparallelen Platten (11, 12) ist in der Fig. 1b detaillierter dargestellt. Das Projektionsobjektiv ist auch hier wiederum mit (4) und dessen optische Achse mit (4a) bezeichnet. Die beiden planparallelen Glasplatten sind auf der zur optischen Achse (4a) parallelen Welle (13) angeordnet. Jede dieser beiden planparallelen Platten (11, 12) hat einen sich über einen Halbkreis erstreckenden Durchbruch (11a, 12a), dessen Breite (d) so gewählt ist, daß der jeweilige Projektionskegel unbeschnitten den jeweiligen Durchbruch in der Platte durchsetzen kann. Zur Vermeidung von Vibrationen und Erschütterungen sind die äußeren Ränder der Planplatten (11, 12) so gewählt, daß ihre Schwerpunkte mit der Mitte der Welle (13) zusammenfallen.

Die Wirkung der planparallelen Platten (11, 12) läßt sich am einfachsten anhand der Fig. 2a und 2b erläutern. Zur Vereinfachung ist auch hier wiederum angenommen, daß das Projektionsobjektiv ohne eingeschwenkten

planparallelen Platten nur einen einzigen Hauptpunkt (4b) hat. Auf der dem Gitter (3) abgewandten Seite dieses Hauptpunktes (4b) ist in der Fig. 2a die planparallele Platte (11) angeordnet. Dadurch ist der bildseitige Hauptpunkt des Gesamtsystems von (4b) nach (4c) um einen Betrag (d1) verschoben. In der Bildebene (20) entsteht ein Bild (3') des Gitters (3). Ist dagegen, wie in der Fig. 2b dargestellt, die planparallele Platte (12) gitterseitig im Abbildungsstrahlengang angeordnet, so verschiebt sich der gitterseitige Hauptpunkt von (4b) nach (4d) um einen Betrag (d2). Der bildseitige Hauptpunkt bleibt dagegen bei (4b) liegen. Durch die Verlagerung der Hauptpunkte von (4b) und (4c) nach (4d) und (4b) entsteht wiederum in derselben Bildebene (20) ein vergrößertes Bild (3'') des Gitters (3). Bei einem Vergleich der Bilder (3') und (3'') der Fig. 2a und 2b erkennt man sofort, daß das Bild (3'') in Fig. 2b größer ist als das Bild (3') in der Fig. 2a. Damit die Bildebene (20), in die das Gitter (3) scharf abgebildet wird, sich beim Übergang von der Fig. 2a zur Fig. 2b nicht verschiebt, verhalten sich die Dicken (D11, D12) zueinander, so daß das Verhältnis $d2/d1$ dem Quadrat der Vergrößerung entspricht, mit dem das Gitter (3) in die Ebene (20) abgebildet ist. Es ist noch anzumerken, daß aus Gründen der Übersichtlichkeit die planparallelen Platten (11, 12) in den Fig. 2a und 2b im Vergleich zu den Gegenstands- und Abbildungsweiten mit übertriebenen Dicken dargestellt sind. In einer realen Meßanordnung sind diese Dicken dagegen erheblich geringer, so daß der Vergrößerungsunterschied nur einen Bruchteil der Vergrößerung ausmacht.

Das Ausführungsbeispiel in der Fig. 3 hat ein Objektiv (34), das einen chromatischen Vergrößerungsfehler hat. Für rotes Licht hat das Objektiv (34) die gestrichelt eingezeichneten Hauptebenen (34b, 34c), und für blaues Licht die durchgezogen eingezeichneten Hauptebenen (34d, 34e). Die meßobjektseitige Hauptebene (34e) für blaues Licht ist gegenüber der meßobjektseitigen Hauptebene für rotes Licht (34c) in Richtung auf das Meßobjekt (0) verschoben. Die Verschiebung der Hauptebenen (34b, 34d) auf der Seite des Gitters (33) ist demgegenüber gerade gegenläufig, d. h. die Hauptebene (34d) für blaues Licht liegt näher an dem Gitter (33) als die Hauptebene (34b) für rotes Licht. Das Gitter (33) wird durch eine Lichtquelle (31), einen Kollektor (32) und einen zwischen dem Kollektor (32) und dem Gitter (33) angeordneten Farbfilter (35) gleichzeitig mit einer Mischung aus rotem und blauem Licht gleichförmig ausgeleuchtet. Aufgrund der unterschiedlichen Lagen der Hauptebenen (34b, 34c) für rotes Licht einerseits und (34e, 34d) für blaues Licht andererseits wird das Gitter (33) farblich codiert mit zwei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben auf das Objekt (0) projiziert. Die Abstände der Hauptebenen sind dabei aber gerade so gewählt, daß für beide Farben das Gitter (33) scharf in das Zentrum (40) des Meßvolumens abgebildet ist. Dadurch ergibt sich für beide farblich codierten Muster auf dem Meßobjekt (0) annähernd der gleiche Streifenkontrast. Die Kamera (37) ist eine Farbkamera, mit einem normalen Objektiv (36), dessen optische Achse (36a) die optische Achse (34a) des Projektionsobjektivs (34) im Zentrum (40) des Meßvolumens schneidet. Der Chip (39) der Kamera (37) ist mit einer Farbmaske (39a) versehen, so daß die Pixel des Kamerachips (39) abwechselnd rot bzw. blau empfindlich sind. Vor dem Chip (39) ist ein Dispersionsprisma (38) angeordnet, durch dessen Wirkung derselbe Punkt innerhalb des Meßvolumens spektral aufgespalten auf benachbarte Pixel des Kamerachips (39) fällt.

Diese Meßvorrichtung erlaubt es somit, mit einem einzigen Gitter (33) innerhalb des Projektors gleichzeitig zwei farblich codierte Muster unterschiedlicher Periodizität auf das Meßobjekt zu projizieren und beide Muster getrennt mit einer einzigen Kamera aufzuzeichnen. Dadurch, daß sich die optischen Achsen (34a, 36a) des Projektionsobjektivs (34) bzw. des Kameraobjektivs (36) in einem Punkt (40) im Meßvolumen schneiden, ist es möglich, als Kamera (37) eine gewöhnliche Farbkamera zu wählen, bei der der Mittelpunkt des Sensorchips (39) annähernd mit der optischen Achse (36a) des Projektionsobjektivs (36) zusammenfällt.

Im folgenden soll die Auswertung der mit der Kamera aufgezeichneten Streifenmuster anhand der Fig. 1c und 5 für den Fall der konvergenten Anordnung, bei denen sich also die optischen Achsen des Kameraobjektivs und des Projektionsobjektivs in einem Punkt schneiden, näher erläutert werden. In der Fig. 1c sind die Strahlengänge der Meßvorrichtung stark schematisiert dargestellt. Das Kameraobjektiv hat eine meßobjektseitige Hauptebene (51) und eine sensorseitige Hauptebene (52). Die Sensorfläche des Kamerachips ist mit (53) bezeichnet. Sie ist im Abstand (ap_0) hinter der kameraseitigen Hauptebene (52) des Kameraobjektivs angeordnet. Um möglichst einfache Auswertegleichungen zu erhalten, ist es zweckmäßig, als Koordinatenursprung den Schnittpunkt zwischen der optischen Achse (58) des Kameraobjektivs und der meßobjektseitigen Hauptebene (51) des Kameraobjektivs zu wählen. Seitlich von der Kamera ist der Projektor angeordnet. Der Projektor hat ein Projektionsobjektiv, dessen optische Achse (57) die optische Achse (58) des Kameraobjektivs in einem Punkt (59) schneidet. Des weiteren ist mit (54) die meßobjektseitige Hauptebene des Kameraobjektivs und mit (55) die gitterseitige Hauptebene des Kameraobjektivs bezeichnet. Der Schnittpunkt zwischen der optischen Achse (57) des Projektors und der meßobjektseitigen Hauptebene (54) hat bezüglich des Koordinatenursprungs die Koordinaten (XP, YP, ZP). Im Abstand (ap_1) hinter der gitterseitigen Hauptebene (55) des Projektionsobjektivs ist das Gitter (56) mit sinusförmigem Transmissionsgrad mit Streifenperiode (G1) angeordnet.

Das Ziel ist es, zu einem Punkt (P = X, Y, Z) im Meßvolumen die Koordinaten (X, Y, Z) aus den Intensitätsmeßwerten in einem Punkt (X0, Y0) der Kamera (53) zu bestimmen. Da in Fig. 1c die Zeichenebene die Y-Z-Ebene ist, ist dort $Y = Y_0 = 0$.

Aus dem Projektionsgesetz folgt zunächst, daß alle Punkte, die in den Punkt (X0, Y0) des Kamerasensors (53) abgebildet sind, auf einer Geraden (60) liegen, die durch die Formel

$$Z = (X_0, Y_0, ap_0) / ap_0 \quad (1)$$

gegeben ist, wobei (X0, Y0) die X- und Y-Koordinate des Bildpunktes auf dem Kamerachip (53) sind.

Des weiteren folgt aufgrund der Zentralprojektion des Gitters (56), daß der Meßpunkt (P) auf einer zweiten Geraden (61) durch das Projektionszentrum mit den Koordinaten (XP, YP, ZP) und durch einen zunächst unbekannten Punkt (X1, Y1) vom Gitter (56) ausgehen muß. Die Gerade (61) ist durch die Formel

$$Z1 = M(X1, Y1, ap1)/ap1 + (XP, YP, ZP) \quad (2)$$

gegeben, wobei Z1 die Projektion der Strecke zwischen dem Meßobjektseitigen Projektionszentrum (XP, YP, ZP) und dem Meßpunkt (P) auf die optische Achse (57) des Projektionsobjektivs ist, und (M) diejenige Drehmatrix ist, die die Drehung der Projektionsachse (57) auf die Kameraachse (60) beschreibt.

Durch Gleichsetzen der Formeln (1) und (2) läßt sich herleiten, daß die Z-Koordinate des Meßpunktes (P) durch die Gleichung

$$Z = \{n11 \cdot XP + n12 \cdot YP + n13 \cdot ZP - (n31 \cdot XP + n32 \cdot YP + n33 \cdot ZP) \cdot X1/ap1\}ap0 / \{n11 \cdot X0 + n12 \cdot Y0 + n13 \cdot ap0 - (n31 \cdot X0 + n32 \cdot Y0 + n33 \cdot ap0) \cdot X1/ap1\} \quad (3)$$

gegeben ist, wobei n11, n12, n13, n31, n32 und n33 die Koeffizienten der zu M-inversen Drehmatrix sind, die also die Drehung der Kameraachse (58) auf die Projektionsachse (57) beschreibt. Ist Z bekannt, so lassen sich die X- und Y-Koordinaten des Punktes (P) aus

$$\begin{aligned} X &= X0 \cdot Z/ap0 \\ X &= Y0 \cdot Z/ap0 \end{aligned} \quad (4)$$

berechnen.

Setzt man des weiteren $X1 = P + X0$, so läßt sich Gleichung (3) nach (P) auflösen und ergibt mit $Z0 = Z/ap0$

$$P = \{n11(Z0 \cdot X0 - XP) + n12(Z0 \cdot Y0 - YP) + n13(Z0 \cdot ap0 - ZP)\}ap1 / \{n31(Z0 \cdot X0 - XP) + n32(Z0 \cdot Y0 - YP) + n33(Z0 \cdot ap0 - ZP)\} - X0 \quad (5)$$

In Gleichung (3) sind außer X1 alle Werte aus dem geometrischen Aufbau bekannt. Da das Gitter (56) periodisch mit der Periodizität (G1) ist, läßt sich X1 entsprechend folgender Gleichung (6) schreiben:

$$X1 = P + X0 = (N1 + D1)G1 \text{ mit } 0 \leq D1 < 1 \text{ und } N1 \text{ ganzzahlig} \quad (6)$$

Wären sowohl die Streifenordnung N1 als auch die Streifenphase D1 bekannt, so könnte man die Koordinaten aus den Gleichungen (3) und (4) eindeutig berechnen. Aus der Intensität im Punkt (X0, Y0) des Kamerasensors (53) läßt sich jedoch mit den in den eingangs zitierten Druckschriften beschriebenen Auswertealgorithmen lediglich die Streifenphase D1 berechnen.

Führt man aber eine zweite Messung mit geändertem Abstand ap2 zwischen dem Gitter (56) und der gitterseitigen Hauptebene (55) des Projektionsobjektivs durch, beispielsweise durch Einschwenken einer planparallelen Platte zwischen dem Gitter (56) und dem Projektionsobjektiv, so mißt man am selben Punkt (X0, Y0) des Kamerasensors (53) die Phase in einem anderen Punkt des Gitters (56) mit der X-Koordinate

$$X2 = P2 + X0 = (N2 + D2)G1 \text{ mit } P2 = P \cdot ap2/ap1. \quad (7)$$

wobei bei der zweiten Messung die Streifenphase D2 ermittelt wird.

Löst man Gleichungen (6) und (7) nach N1 und N2 auf und subtrahiert beide Gleichungen voneinander, so ergibt sich

$$P = (N12 + D1 - D2)G1 / (1 - ap2/ap1) \quad (8)$$

Dabei hat die Schwebungsordnung ($N12 = N1 - N2$) innerhalb des Meßvolumens einen konstanten bekannten Wert. Die Gitterkonstante (G1), die Gitterabstände (ap1, ap2) sind ebenfalls bekannt, und die Streifenphasen (D1, D2) können aus den Intensitätsmeßwerten eindeutig durch die bekannten Phasenauswertealgorithmen bestimmt werden.

Die Auswertung kann dann anhand des in der Fig. 5 dargestellten Flußdiagramms folgendermaßen ablaufen:

Die von der Kamera (53) aufgenommenen Bilder des Meßobjektes werden zunächst digitalisiert, und in einer ersten Funktionsbaugruppe (64) werden die Streifenphasen der aufgezeichneten Kamerabilder berechnet. Die Berechnung der Streifenphasen in der Funktionsbaugruppe (64) kann beispielsweise anhand der aus der DE-OS 40 14 019 bekannten Auswertealgorithmen erfolgen. Bei diesem Verfahren wird aus jedem einzelnen Kamerabild die Streifenphase in jedem Pixel der Kamera berechnet. Die durch die Phasenauswertung erstellten Phasenkarten werden in zwei Bildspeichern (65a, 65b) abgelegt. Dabei ist in dem ersten Bildspeicher (65a) die Phasenkarte, d. h. die Streifenphase (D1) für jedes Pixel (X0, Y0) des mit dem ersten Gitterabstands (ap1) aufgezeichneten Kamerabildes und im zweiten Bildspeicher (65b) die entsprechenden Streifenphasen des mit zweitem Gitterabstand (ap2) aufgezeichneten Kamerabildes abgespeichert. Durch Differenzbildung der Streifenphasen (D1, D2) für jedes Kamerapixel wird in einer Berechnungsstufe (66) entsprechend Gleichung (8) ein grober Wert für die Größe (P) und in einer zweiten Berechnungsstufe (67) anhand Gleichung (3) ein grober Z-Wert berechnet. In einer weiteren Rechenstufe (68) erfolgt die Bestimmung der Phasenordnung (N1) aus dem groben Z-Wert und dem Phasenwert (D1) entsprechend Gleichung (6), wobei der zunächst berechnete Wert auf die nächstliegende ganze Zahl gerundet wird. Aus der so bestimmten Phasenordnung (N1) und der Streifenphase (D1) erfolgt durch nochmalige Anwendung der Gleichung (6) in einer weiteren Rechenstufe (69) die Berechnung eines genaueren Wertes für die Größe (P). Durch Einsetzen dieses genaueren Wertes für die Größe (P) in die Gleichung (3) erfolgt in einer weiteren Rechenstufe (70) die Berechnung eines genauen Z-Wertes und in einer

Rechenstufe (71) die Bestimmung der X- und Y-Koordinaten anhand der Gleichung (4).

Im Falle, daß durch meßobjektseitiges Einschwenken einer Glasplatte der Abbildungsmaßstab, mit dem das Gitter (56) auf das Objekt projiziert ist, variiert wird, ergeben sich für beide Projektionszustände unterschiedliche meßobjektseitige Projektionszentren (XP, YP, ZP). Für jeden Projektionszustand folgt dann eine eigene Gleichung (3) und eine eigene Gleichung (5) für die größten (P1) und (P2) in den beiden Projektionszuständen. Durch Vergleich dieser beiden Gleichungen für die Größen (P1, P2) sind dann zu den Gleichungen (7) und (8) analoge Gleichungen herleitbar, die beschreiben, wie die Größen (P1, P2) für beide Projektionszustände zusammenhängen. Die Auswertung erfolgt dann wiederum entsprechend des in Fig. 5 dargestellten Flußdiagrammes, wobei lediglich in den Berechnungsstufen (66, 67) andere, zu den Gleichungen (7) und (8) analoge Gleichungen zur Berechnung der groben Werte für die Größen (P und Z) aus der Differenz der Phasenwerte (D1 und D2), also der Schwebung der mit unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben projizierten Muster berechnet werden.

In dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 4 sind die optischen Achsen (44a) des Projektionsobjektivs (44) und die optische Achse (48a) des Kameraobjektivs (48) annähernd parallel zueinander ausgerichtet. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist es vorteilhaft, die in den Projektionsstrahlengang einschwenkbaren Platten (49, 50) zur optischen Achse (44a) des Projektionsobjektivs geneigt anzuordnen, so daß die Flächennormale (49a) der Planplatte (49) einen von Null verschiedenen Winkel α mit der optischen Achse (44a) des Projektionsobjektivs einschließt. Durch die geneigte Anordnung der planparallelen Glasplatte (49) ist im zweiten Projektionszustand, in dem die Planplatte (49) objektseitig im Projektionsstrahlengang eingeschwenkt ist, das objektseitige Projektionszentrum nicht nur in Z-Richtung sondern auch senkrecht zu dem Streifenmuster in X-Richtung verschoben. Im zweiten Projektionszustand erfolgt dann die Projektion mit einer virtuellen optischen Achse (44b), die einen geänderten Abstand zur Kameraachse (48a) hat. Dadurch ist der durch die planparallele Glasplatte (49) verursachte Effekt verstärkt, so daß die planparallele Platte (49) dünner gewählt sein kann.

Es ist noch anzumerken, daß die Berechnung der Phasenkarten aus den Kamerabildern nicht unbedingt durch Auswertung im Ortsbereich, beispielsweise anhand des in der DE-OS 40 14 019 beschriebenen Verfahrens erfolgen muß. Es ist vielmehr auch möglich, Phasenauswertalgorithmen zu verwenden, die im Zeitbereich arbeiten, bei denen also mehrere Muster mit der Kamera aufgezeichnet werden, zwischen denen jeweils das Projektionsgitter in der Gitterebene verschoben wird. Derartige Auswertalgorithmen sind beispielsweise in der eingangs zitierten EP-OS 03 79 079 beschrieben. Erfolgt die Bestimmung der Phasenwerte im Zeitbereich, so ist auch beim erfindungsgemäßen Verfahren und bei den erfindungsgemäßen Vorrichtungen das Gitter jeweils in der Gitterebene zu verschieben. Diese Möglichkeit ist in der Fig. 1a durch den Pfeil (Pf) angedeutet.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Vermessung von Objektoberflächen innerhalb eines Meßvolumens mittels auf die Objektoberfläche projizierter Streifenmuster mit einer Kamera zur Aufzeichnung der Streifenmuster und einem der Kamera nachgeschalteten Auswerterechner zur Berechnung der Objektoberfläche aus den aufgezeichneten Streifenmustern, dadurch gekennzeichnet, daß dasselbe innerhalb des Projektors erzeugte Streifenmuster mit mindestens zwei unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben auf die Objektoberfläche projiziert wird und die Schwebung zwischen den mit unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben projizierten Mustern zur Auswertung herangezogen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Streifenmuster jeweils in Zentralprojektion in das Meßvolumen projiziert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Streifenmuster jeweils durch dasselbe Projektionsobjektiv (4, 34, 44) projiziert wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Änderung des Abbildungsmaßstabes die Lage des meßobjektseitigen Projektionszentrums (4c) bzw. der meßobjektseitigen Hauptebene (34c; 34e; 54) variiert wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß ein einziges Gitter (3; 33; 56) projiziert und der Abstand zwischen dem Gitter (3; 33; 56) und dem gitterseitigen Hauptpunkt (4d) bzw. der gitterseitigen Hauptebene (34b; 34d; 55) des Projektionsobjektivs (4; 34) variiert wird.
6. Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen innerhalb eines Meßvolumens mit
 - einem Streifenprojektor mit einem Projektionsobjektiv zur Projektion von Streifenmustern in das Meßvolumen,
 - einer Kamera zur Aufzeichnung der an der Objektoberfläche deformierten Streifenmuster,
 - einem der Kamera nachgeschalteten Auswerterechner zur Berechnung der Objektoberfläche aus den aufgezeichneten Streifenmustern, wobei unter Ausnutzung der Schwebung zweier projizierter Muster unterschiedlicher Periode innerhalb eines großen Meßvolumens eindeutige Meßwerte für die Objektoberfläche bestimmbar sind, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel (11, 12; 49, 50; 34) zur Änderung des Abbildungsmaßstabes, mit dem das Streifenmuster in das Meßvolumen abgebildet ist, vorgesehen sind.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß im Streifenprojektor ein einziges Gitter (3; 33; 56) mit einer periodischen streifenförmigen Transmissionscharakteristik angeordnet ist, und daß die Mittel zur Änderung des Abbildungsmaßstabes eine oder mehrere in den Projektionsstrahlengang einschwenkbare planparallele Platten (11, 12; 49, 50) oder konzentrische Menisken sind.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die planparallelen Platten (49, 50) oder konzentrischen Menisken unter einem Winkel α in den Projektionsstrahlengang einschaltbar sind.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß eine erste planparallele Platte (11; 49) meßobjektseitig und eine zweite planparallele Platte (12; 50)

gitterseitig in den Projektionsstrahlengang einschwenkbar sind, und daß das Dickenverhältnis beider planparalleler Platten bzw. konzentrischer Menisken proportional zum Quadrat des Abbildungsmaßstabes ist, mit dem das Gitter (3) in das Meßvolumen (5) abgebildet ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die planparallelen Platten (11, 12; 49, 50) abwechselnd objektseitig bzw. gitterseitig in den Projektionsstrahlengang einschaltbar sind.

11. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß im Streifenprojektor ein einziges Gitter mit einer periodischen streifenförmigen Transmissionscharakteristik angeordnet ist, und daß zur Änderung des Abbildungsmaßstabes der Abstand zwischen dem Gitter (33) und der gitterseitigen Hauptebene (34b, 34d) des Projektionsobjektivs (34) variierbar ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv (34) eine chromatische Vergrößerungsdifferenz aufweist, daß Mittel (31, 32, 35) zur Beleuchtung des Gitter (33) mit zwei unterschiedlichen Farben und eine Kamera (37) zur getrennten Aufzeichnung der mit unterschiedlichen Farben projizierten Muster vorgesehen ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv (4; 34) und das Kameraobjektiv (8; 36) unter einem Winkel zueinander angeordnet sind, so daß sich die optische Achse (4a; 34a) des Projektionsobjektivs (4; 34) und die optische Achse (8a; 36a) des Kameraobjektivs (8; 36) in einem Punkt (10; 40) des Meßvolumens schneiden.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1a

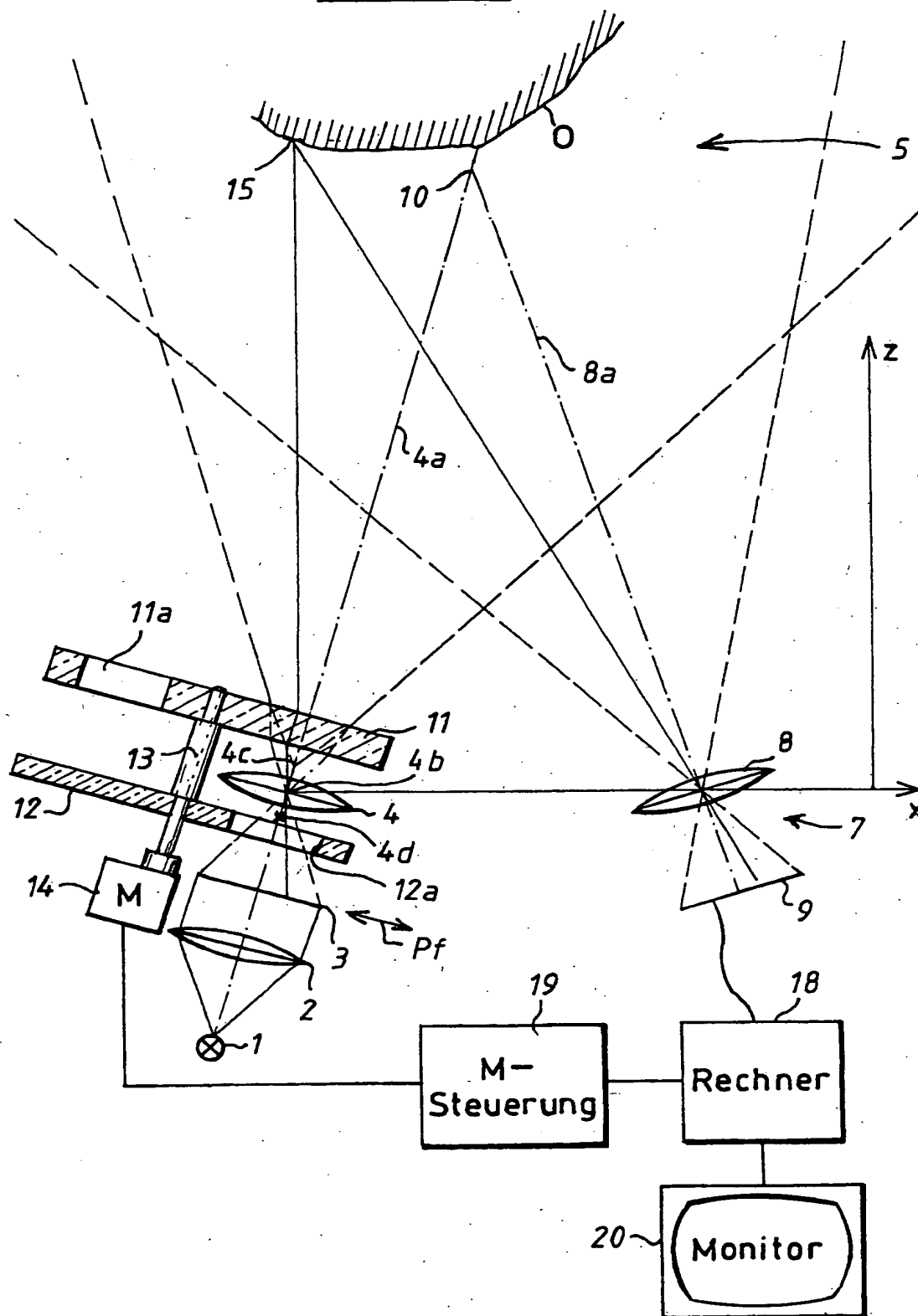


FIG 1b

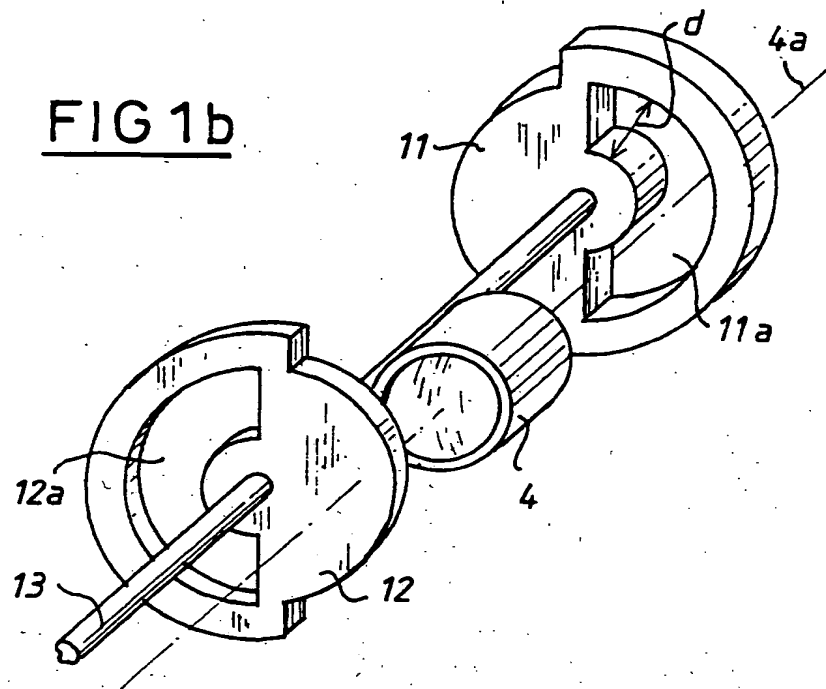


FIG. 1c

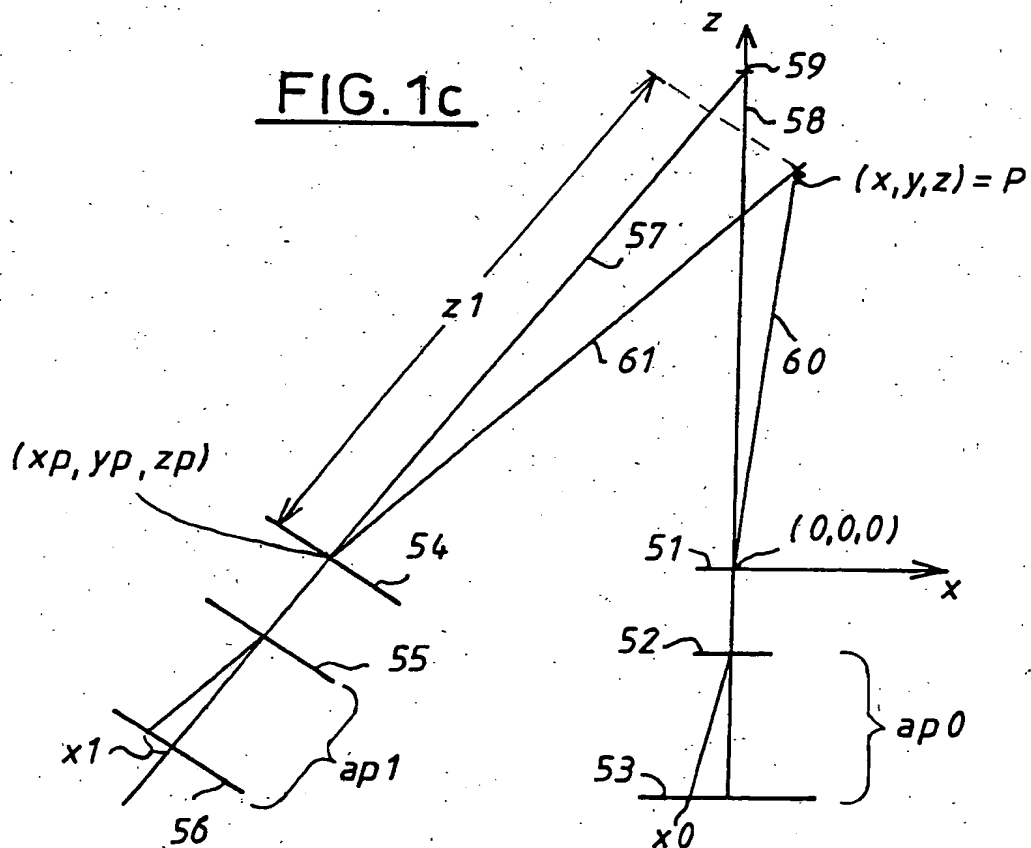


FIG. 2a

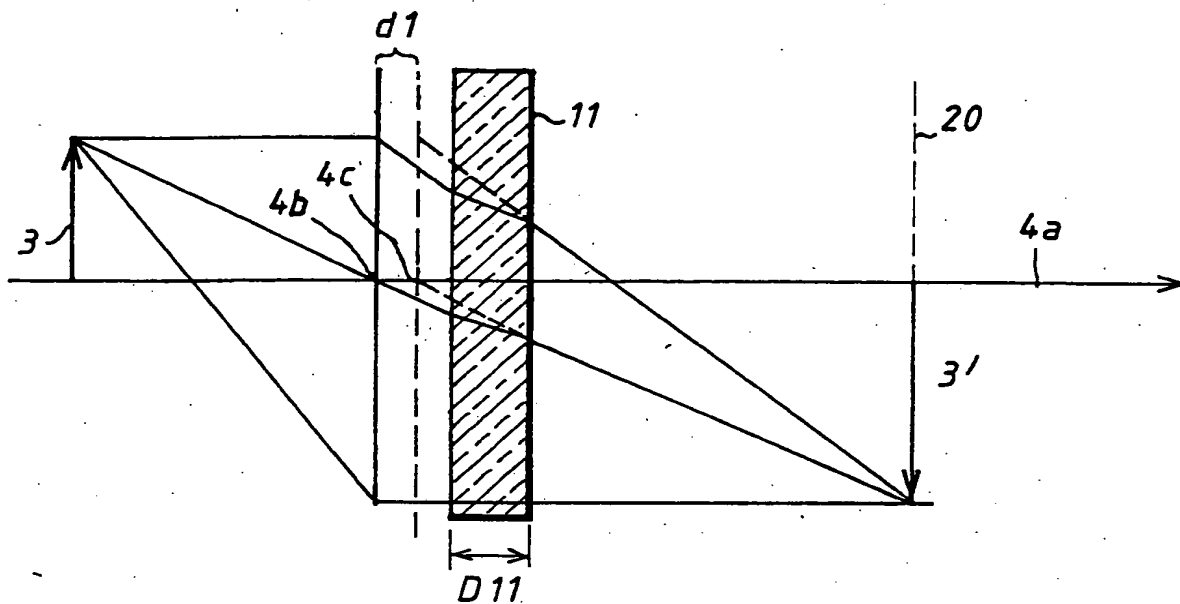


FIG. 2b

